

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: X200431039

UDC

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

二自由度机械臂控制系统的设计与实现

The Design and Realization of 2-DOF Robot Manipulator
Control Systems

曾 岩

指导教师姓名: 彭 侠 夫 教 授

曾 春 志 高级工程师

专 业 名 称: 控制工程

论文提交日期: 2008 年 5 月

论文答辩时间: 2008 年 6 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: 罗键

评 阅 人:

2008 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

在20世纪30到40年代，奈奎斯特、伯德、维纳等人的著作作为自动控制理论的初步形成奠定了基础；二次大战以后，经过众多学者的努力，形成了较为完整的自动控制系统设计的频率法理论和根轨迹法理论。这种建立在频率法和根轨迹法基础上的理论，通常被称为经典控制理论。随着现代科学技术的迅速发展，控制对象、控制器以及控制任务和目的的日益复杂化，以数学建模和数值计算为基础的经典控制理论面临许多新问题，如：计算复杂性的急剧增加；建模的困难越来越大；多输入和输入信息多样化；非线性系统的控制等等，所以诞生了以状态空间法为基础的现代控制理论。较之经典控制理论，现代控制理论的使用范围更广泛，它既可以适合单变量的、线性的、定常的、连续的系统，也可以适合多变量的、非线性的、时变的、离散的系统。随着科学技术的突飞猛进，对工业过程控制的要求越来越高，不仅要求控制的精确性，更注重控制的鲁棒性、实时性、容错性以及控制参数的自适应和学习能力。另外，需要控制的工业过程日趋复杂、工业过程严重的非线性和不确定性，使许多系统无法用数学模型精确描述，现代控制方法面临空前的挑战。为解决以上现代控制系统存在的问题，“大系统理论”、“复杂系统”及“智能控制”是目前控制理论较为热门的研究方向。

近年来，得益于计算机科学技术和智能信息处理的高速发展，智能控制理论与智能化系统发展十分迅速。其中代表性的理论有专家系统、模糊逻辑控制、神经网络控制、遗传算法、混沌控制等。模糊逻辑控制作为智能控制的一种重要方法，近年来发展很快。模糊控制实质上是一种非线性控制，它采用模糊语言描述系统，既可以描述应用系统的定量模型也可以描述其定性模型，所以模糊逻辑可适用于任意复杂的对象控制。

本文通过研究模糊控制理论的发展和应用，对比PID算法和其他模糊控制算法，阐述自组织模糊控制方法的优势。本文使用MATLAB仿真自组织模糊控制算法对二自由度机械臂的控制，说明自组织模糊控制算法的可行性和有效性。为了验证本文所提出的自组织模糊控制器的可行性，本人研究制作了一套二自由度机械手臂控制系统以评估模糊自组织控制的可行性。实验结果证实，自组织模糊控制器在减少机械臂关节空间轨迹追踪误差上，比传统模糊控制器有较佳的控制性能。

关键词：机械臂，自动控制，PID 控制，模糊逻辑，自组织模糊控制器。

厦门大学博硕士论文摘要库

The Design and Realization of 2-DOF Robot Manipulator control system

ABSTRACT

During the period of 1930s to 1940s, Automatic Control Theory preliminarily formed based on Nyquist, Bode and Wiener's works. The relatively complete theory of frequency method and root locus method for the design of automatic control system was set up through the efforts of numerous scholars after world war II. With the rapid development of modern scientific technology, control object, controller and control tasks&goal are becoming more and more complicated. The classical control theory based on precise modeling and numerical calculation is facing many new problems such as the rapid increase of computing complexity, the more and more difficulty of precise modeling, multi-input &diversification of input information and nonlinear system control. Therefore the modern control theory based on state space method was set up. Compared to classical control theory, modern control theory has been used more widely. It can not only adapt to the system that is single variable, linear, steady and continuous but also to the system that is multiple variable, nonlinear, time-varying, discrete. With the rapid development of scientific technology, the requirement of industrial process control is becoming higher and higher. It focuses much more on the robustness, real-time performance, faulty-tolerance capacity, self-adaptability of the control parameter than the precision of control. Also, with the controlled industrial process being more and more complicated plus the industrial process of typical linearity and uncertainty, many systems cannot be accurately described by mathematic model and modern control method is facing unprecedented challenge. To solve the above problems in modern control system, Large Scale System Theory, Complex System and Intelligence Control are the research directions for the current control theory.

With the rapid development of computer science and intelligence information processing in recent years, intelligence control theory and intelligence system is developing very fast too. Among them the representative theories are Expert System, Fuzzy Logic Control, Neural Network Control, Genetic Algorithm and Chaos Control etc. Fuzzy Logic Control is one of the important method of intelligence control is growing very fast in recent years. The substance of Fuzzy Logic Control is nonlinear control. It adopts fuzzy language description system which can not only describe the application system's quantitative model but also can describe its qualitative model. Therefore fuzzy logic can be adapted to any complicated object control.

This article describes the advantage of self-organizing fuzzy control through the study of the development and application of fuzzy control theory and the comparison of PID with other fuzzy control algorithm.

This article use MATLAB to simulate the algorithm of Self-organizing Fuzzy Control to control the 2-DoF robot arm and illustrate the feasibility and availability of algorithm of Self-organizing Fuzzy Control. To evaluate the feasibility of self-organizing fuzzy controller, I make one set of 2-DoF manipulator control system. The experimental result shows self-organizing fuzzy controller has better control performance than traditional fuzzy controller in reducing errors in the tracing of space trajectory of robot arm joint.

Key Words: Manipulator, Automatic control, PID Control, Fuzzy control, Self-Organized controller.

目 录

厦门大学学位论文著作权使用声明	2
摘 要	I
第一章 绪 论	1
1. 1 课题的背景及意义	1
1. 2 本论文的主要工作	2
1. 3 机器人研究及控制算法现状	2
1. 3. 1 控制理论的发展	2
1. 3. 2 机器人及其控制技术的发展	5
1. 3. 3 模糊控制理论概述	10
1. 3. 4 MATLAB 的运用	14
第二章 机械臂控制系统概述	15
2. 1 二自由度机械臂运动学分析	15
2. 1. 1 机械臂工作空间分析	15
2. 1. 2 机械臂运动学解	16
2. 2 二自由度运动路径规划	20
2. 2. 3 直角坐标空间运动路径规划算法	20
2. 2. 4 直线插补和圆弧插补算法	22
第三章 PID 控制与自组织模糊控制	25
3. 1 PID 控制	25
3. 1. 1 数字 PID 控制	25
3. 2 自组织模糊控制	27
3. 2. 1 在线形式的自组织模糊控制	28
3. 2. 2 离线形式的自组织模糊控制	28
3. 2. 3 基于神经网络的自组织模糊控制	28
3. 2. 4 与常规控制算法的结合	29
第四章 控制算法建模及仿真比较	31
4. 1 PID 模糊控制器建模	31
4. 1. 1 PID 模糊建模	32
4. 1. 2 PID 模糊控制	33
4. 1. 2 PID 模糊控制仿真	35
4. 2 自组织模糊控制建模	39
4. 2. 1 自组织模糊控制器建模	39
4. 2. 2 自组织模糊控制仿真	42
4. 3 仿真结果比较	50
第五章 二自由度机械臂系统的设计与实现	51

5. 1 二自由度机械臂硬件设计	51
5. 1. 1 二自由度机械臂机械结构设计	52
5. 1. 2 二自由度机械臂电路设计	52
5. 1. 3 硬件组装	54
5. 2 二自由度机械臂软件设计	55
5. 2. 1 MATLAB 图形分析程序设计.....	55
5. 2. 2 控制器的 MATLAB 程序设计.....	55
5. 2. 3 AVR 单片机程序设计.....	58
5. 3 系统控制流程	59
5. 4 系统的实现	59
5. 5 实验结果	59
第六章 总结与展望	61
6. 1 工作总结	61
6. 2 展望	61
【参考文献】	63
致 谢	65

CONTENTS

DECLARATION OF XIAMEN UNIVERSITY DISSERTATION COPYRIGHT	2
Abstract.....	1
CHPATER 1 Exordium.....	1
1. 1 Background & Significance of the subject.....	1
1. 2 Main work of this paper.....	2
1. 3 Current situation of robot research and controls algorithm.....	2
1. 3. 1 Development of control theroy.....	2
1. 3. 2 Development Robot and its control technology.....	5
1. 3. 3 Summary of fuzzy control theory.....	10
1. 3. 4 Appliacion of MATLAB.....	14
CHAPTER 2 Summary of control system for manipulator.....	15
2. 1 Analysis of 2-DoF manipulator kinematics.....	15
2. 1. 1 Analysis of manipulator workspace.....	15
2. 1. 2 Manipulator kinematics.....	16
2. 2 2-DoF motion path planning.....	20
2. 2. 3 Motion path planning based on rectangular coordinates space..	20
2. 2. 4 Linear/circular interpolation.....	22
CHAPTER 3 PID fuzzy logic and Self-organized fuzzy control.....	25
3. 1 PID control.....	25
3. 1. 1 Digital PID control.....	25
3. 2 Self-organizied fuzzy control.....	27
3. 2. 1 Online self-organizied fuzzy control.....	28
3. 2. 2 Offline self-organizied fuzzy control.....	28
3. 2. 3 Based on neuralnetwork self_organizied fuzzy control.....	28
3. 2. 4 Integration with conventional control.....	29
CHAPTER 4 Control modeling and simulation.....	31
4. 1 PID fuzzy controler modeling.....	31
4. 1. 1 PID fuzzy modeling.....	32
4. 1. 2 PID fuzzy control.....	33
4. 1. 2 PID fuzzy control simulation.....	35
4. 2 Self-organizied controler modeling.....	39
4. 2. 1 Self-organizied controler modeling.....	39
4. 2. 2 Self-organizied control simulation.....	42
4. 3 Simulation results comparsion.....	50
CHAPTER 5 Design and implementation of 2-DoF manipulator system.	51

5. 1 Hardware design of 2-DoF manipulator	51
5. 1. 1 Mechanical structur design of 2-DoF manipulator	52
5. 1. 2 Circuit design of 2-DoF manipulator	52
5. 1. 3 Hardware assembly	54
5. 2 Software design of 2-DoF manipulator	55
5. 2. 1 MATLAB programming for graphic analysis	55
5. 2. 2 MATLAB programming for controler	55
5. 2. 3 AVR MCU programming	58
5. 3 Flow chart of control process	59
5. 4 System implementation	59
5. 5 Experiment conclusion	59
CHAPTER 6 Summary and prospect	61
6. 1 Work summary	61
6. 2 Prospect	61
Reference	63
Acknowledge	65

第一章 绪 论

1.1 课题的背景及意义

自动控制理论是自动控制科学的核心。自动控制理论创建至今已经过了三代的发展：第一代是20世纪初开始形成并于50年代趋于成熟的经典反馈控制理论；第二代是50、60年代在现代数学基础上发展起来的现代控制理论；第三代是60年代中期即已萌芽，在发展过程中综合了人工智能、自动控制、运筹学、信息论等多学科的最新成果并在此基础上形成的智能控制理论。经典控制理论和现代控制理论都是建立在控制对象精确模型上的控制理论，而实际上的工业生产系统中的控制对象和过程大多具有非线性、时变性、变结构、不确定性、多层次、多因素等特点，难以建立精确的数学模型，因此，自动控制专家和学者希望能从要解决问题领域的知识出发，利用熟练操作者的丰富经验、思维和判断能力，来实现对上述复杂系统的控制。

自从19世纪麦克斯韦对具有调速器的蒸汽发动机系统进行线性常微分方程描述及稳定性分析以来，经过20世纪初乃奎斯特、伯德等人的杰出工作，完成了经典反馈控制理论基础，并于50年代趋于成熟。经典控制理论的特点是以传递函数为数学工具，采用频域方法，主要研究“单输入—单输出”线性定常控制系统的分析与设计，但它存在一定的局限性，经典控制理论无法解决“多输入—多输出”系统的问题，特别是对非线性、时变系统更是无能为力。随着20世纪40年代中期计算机的出现及其应用领域的不断扩展，促进了自动控制理论朝着更为复杂也更为严密的方向发展。在前苏联庞特里亚金提出的极大值原理的基础上，及美国科学家Kalman的研究的基础上，在20世纪50、60年代开始出现了以状态空间分析为基础的现代控制理论。现代控制理论本质上是一种“时域法”，其研究内容非常广泛，主要包括三个基本内容：多变量线性系统理论、最优控制理论以及最优估计与系统辨识理论。现代控制理论从理论上解决了系统的可控性、可观测性、稳定性以及许多复杂系统的控制问题。但是，随着现代科学技术的迅速发展，生产系统的规模越来越大，形成了复杂的大系统，导致控制对象、控制器以及控制任务和目的的日益复杂化，经典控制理论、现代控制理论在应用中遇到了不少难题，影响了它们的实际应用，其主要原因有三：1) 这些控制系统的设计和分析都是建立在精确的数学模型的基础上的，而实际系统由于存在不确定性、不完全性、模糊性、时变性、非线性等因素，一般很难获得精确的数学模型；2) 研究这些系统时，人们必须提出一些比较苛刻的假设，而这些假设在应用中往往不能完全满足；3) 为了提高控制性能，整个控制系

统变得复杂，这不仅增加了设备投资，也降低了系统的可靠性。于是，自动控制工作者一直在寻求新的出路，他们在考虑：能否不要完全以控制对象为研究主体，而以控制器为研究主体呢？能否用 20 世纪 50 年代中期出现并得到快速发展的人工智能的逻辑推理、启发式知识、专家系统等来解决难以建立精确数学模型的控制问题呢？第三代控制理论，即智能控制理论就是在这样的背景下提出来的，它是人工智能和自动控制交叉的产物，是当今自动控制科学的发展出路之一。

在改善工业生产力和产品的质量上，自动化是一个最有效的途径，而机械手臂系统在工业生产自动化中扮演着极为重要的角色。机械手臂已被广泛地应用于如自动装配、组合和抽取对象或一些具危险性、困难且不适合人力担负的工作。在机械手臂自动化的控制上，要求能精确地控制机械手臂的运动轨迹，因此，采用精确的控制技术控制机械手臂的运动，变得极为重要。然而机械手臂在运动时，明显地具有非线性的动态特性，其运动的数学模式非常复杂且不易建立，因此，使用传统建模方式为基础的经典控制理论和现代控制理论，很难设计出适当的控制器。

为使机器手臂系统能更好地应用于生产实践，解决机器人控制中的问题，各种相关地控制理论不断地被创造出来，并且还在不断地发展。模糊控制理论是在不知道控制系统的数学模式情况下，即可对系统施以控制的一种新的控制理论。使用模糊控制策略能够补偿操作环境变化对系统所造成的影响，此种控制特性，非常适合应用于拥有复杂动力学及在不确定性工作环境下工作之机械手臂的控制。

自组织模糊控制理论是在原有的模糊控制理论上发展出来的，它克服了一般模糊控制理论控制精度低、自适应能力差的缺点，又有效解决了机器人控制中的控制建模难、非线性运动控制精度差的问题，将其用于工业机器人的生产实践能产生不错的效益。

1. 2 本论文的主要工作

本文通过对自组织模糊控制理论的分析，对比其他理论阐述其优点。在 MATLAB 上对模糊控制进行仿真，建立模糊控制数学模型。制作二自由度机械臂实体，用建立好的模糊控制模型进行控制，以验证理论的有效性。

1. 3 机器人研究及控制算法现状

1. 3. 1 控制理论的发展

1. 经典控制理论的发展及基本内容

自动控制中一个最基本的概念是反馈，人类对反馈控制的应用可以追溯到很早的时

期。但是，直到产业革命时期，瓦特发明蒸汽机离心飞锤式调速器，解决了在负载变化条件下保持蒸汽机基本恒速的问题，反馈控制才引起人们的重视。从那时起的 100 多年以来，随着社会生产力的发展和需要，控制理论技术也得到了不断的发展和提高。在 20 世纪 30 至 40 年代期间，乃奎斯特于 1932 年提出稳定性的频率判据，伯德于 1940 年在频率法中引入对数坐标系，1948 年维纳发表了划时代的著作《控制论》，以及后来一些科学家的努力和卓越的工作，从而奠定了经典控制理论的基础。到 20 世纪 50 年代，经典控制理论已趋于成熟。

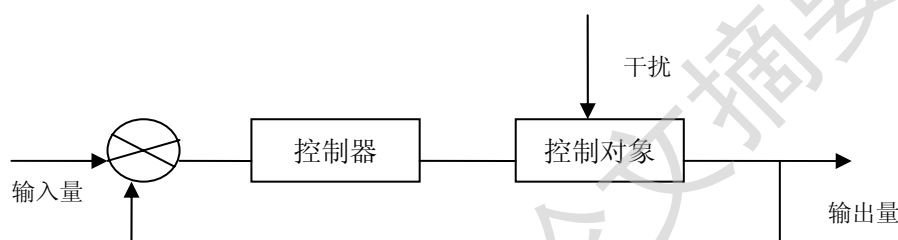


图 1-1 反馈控制系统的原理图

经典控制理论主要研究线性定常系统。所谓线性控制系统是指系统中各组成环节或元件的状态由线性微分方程描述的控制系统。如果描述该线性系统的微分方程系数是常数，则称为线性定常系统。描述自动控制系统输入量、输出量和内部量之间关系的数学表达式称为系统的数学模型，它是分析和设计控制系统的基础。经典控制理论中广泛使用的频率法和根轨迹法，是建立在传递函数基础上的。线性定常系统的传递函数是在零初始条件下系统输出量的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比，是描述系统的频域模型。传递函数只描述了系统的输入、输出关系，没有内部变量的表示，本质上是频域方法，主要研究“单输入—单输出”线性定常控制系统的分析与设计，对线性定常系统已形成相当成熟的理论。典型的经典控制理论包括 PID 控制、Smith 控制、解耦控制、大林控制、串级控制等。经典控制理论尽管原则上只适用于解决“单输入—单输出”系统的分析与设计问题，但经典控制理论至今仍活跃在各种工业控制领域中。事实上，经典控制理论现在仍不失其价值和适用意义，仍是进一步研究现代控制理论和智能控制理论的基础。

2. 现代控制理论的发展及其基本内容

经典控制理论虽然具有很大的实用价值，但也有着明显的局限性，表现在下面二个

方面：第一，经典控制理论建立在传递函数和频率特性的基础上，而传递函数和频率特性均属于系统的外部描述，不能充分反映系统内部的状态；第二，无论是根轨迹法还是频率法，本质上是频域法，都要通过积分变换、拉普拉斯变换、傅立叶变换、Z 变换。因此原则上只适宜解决“单输入—单输出”线性定常系统的问题，对“多输入—多输出”系统就无法解决，对非线性系统更是无能为力。

现代控制理论正是为了克服经典控制理论的局限性而在 20 世纪 50、60 年代逐步发展起来的。现代控制理论本质上是一种“时域法”。它引入了“状态”的概念，用“状态变量”及“状态方程”描述系统，因而比“频域法”更能反映出系统的内在本质与特性。从数学的观点看，现代控制理论的“状态变量”法，就是将描述系统运动的高阶微分方程改写成一阶联立微分方程组，或将系统的运动直接用一阶微分方程组表示。这个一阶微分方程组就叫“状态方程”。采用状态方程后，最主要的优点是系统的运动方程可以采用向量、矩阵表示，因此形式简单、概念清晰、运算方便，尤其是在处理多变量、时变系统优势更是明显。现代控制理论研究的主要内容包括三个方面：多变量线性系统理论、最优控制理论以及最优估计与系统辨识理论。

但是，随着现代科学技术的迅速发展，生产系统的规模越来越大，形成了复杂的大系统，控制对象、控制器以及控制任务和目的的日益复杂化，导致了现代控制理论的成果在实际应用中遇到很大困难。

3. 智能控制理论的发展及基本内容

“智能控制”这一概念是美籍华人傅京孙教授于 20 世纪 70 年代初提出来的。早在 1965 年，傅京孙教授就提出把人工智能领域中的启发式规则用于学习系统，这一时期可以看作是“智能控制”思想的萌芽阶段。“智能控制”是在当时经典控制理论和现代控制理论在实际应用中面临着严峻挑战的时期而提出来的，它是人工智能和自动控制交叉的产物。

智能控制是指驱动智能机器自主地实现其目标的过程，也就是说，智能控制是一类无需人的直接干预就能实现其目标的自动控制。智能控制的基础是人工智能、控制论、运筹学和信息论等学科的交叉。智能控制理论及系统具有以下几个鲜明的特点：第一，在分析和设计智能系统时，重点不要放在传统控制器的分析和设计上，而要放在智能机模型上，也就是不要把重点放在对数学公式的描述、计算和处理上（实际上，一些复杂的大系统可能根本无法用精确的数学模型进行描述），而要把重点放在对非数学模型的描

述、符号和环境的识别、知识库和推理机设计和开发等上面来。第二、智能控制的核心是高层控制，其任务在于对实际环境或过程进行组织，即决策和规划，实现广义问题求解。第三，智能控制是一门边缘交叉学科，傅京孙教授于 1971 年首先提出了智能控制的二元交叉集理论，后人又将二元结构扩展成三元结构、四元结构，从而进一步完善了智能控制的结构理论。第四，智能控制是一个新兴的研究和应用领域，有着极其诱人的发展前途，是现今控制理论发展的一个重要的方向。

从“智能控制”概念提出到现在，自动控制和人工智能专家已经提出了各种智能控制理论，如：递阶智能控制、专家智能控制、模糊智能控制、神经网络智能控制、学习控制系统等等，有些已经在实际应用中发挥了重要作用。

以上我们分析了自动控制理论的发展情况，详细介绍了三代控制理论的特点。三代的控制理论各有其优缺点，如果能取长补短、综合运用，必然能在实际生产过程中取得不错的控制效果。事实上，现在已经出现了集经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论于一身的各种复合理论，如模糊 PID 控制、自适应模糊控制、专家 PID 控制、模糊神经网络等等，这也是今后自动控制理论发展的一个方向。

1. 3. 2 机器人及其控制技术的发展

机器人的诞生和发展与科学技术革命有着密切的关系，符合科技革命关于生产实践需要的理论。机器人作为一种高技术产品，也是不断发展和完善的，这种不断的发展和完善是通过科技革命的内在推动力来实现的。同时，机器人的发展和广泛应用，使科学技术成为显见的生产力，极大地推动着科学技术的发展，推动着人民生活的改善，推动着生产力的提高，推动着整个社会的进步。机器人技术作为当今科学技术发展的前沿学科，将成为未来社会生产和生活中不可缺少的角色。

关于机器人这一思想的渊源，可以追溯到遥远的古代。早在我国西周时期，就有能工巧匠偃师制作了一个歌舞“机器人”献给周穆王；公元前 3 世纪，古希腊发明家戴达罗斯用青铜为克里特岛国王迈诺斯塑造了一个守卫宝岛的青铜卫士塔罗斯；我国东汉时期，张衡发明了用于军事的指南车，这些都是最早的机器人雏形。这些自动玩具的出现均是以当时的科学和技术为基础的，它们的功能是单一的，只能按顺序完成几个既定的动作，还谈不上控制。这些机械人实现方法虽然很落后，但它们却代表了当时的最高科技水平。

随着电子计算机的出现、电子技术的发展，产业领域出现了受计算机控制的可编程的数控机床，与机器人相关的控制技术和零部件加工有了扎实的基础。另一方面，人类

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库